

На правах рукописи



Витова Татьяна Брониславовна

**ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) Институте вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН), г. Красноярск

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, **Кирик Екатерина Сергеевна**

Официальные оппоненты:

Казунина Галина Алексеевна, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, профессор

Мурзин Фёдор Александрович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем информатики им. А.П. Ершова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, заместитель директора по науке

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск

Защита состоится 31 октября 2017 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 003.061.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВМиМГ СО РАН, тел. +7 (383) 330-71-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук: <http://icmmg.nsc.ru>.

Автореферат разослан 19 июня 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н.



Сорокин Сергей Борисович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Задача моделирования движения людей возникла в связи с проблемами обеспечения безопасной эвакуации из зданий и сооружений. В настоящее время область применения таких моделей расширяется. Они служат для анализа процесса эвакуации из существующих и строящихся зданий и сооружений (расчёт времени эвакуации, выявление участков повышенной плотности, определение наилучшей геометрии пространства, разработка планов эвакуации, обучение персонала эффективной (безопасной) стратегии эвакуации и т. п.) и для организации движения (маршрутизации) движения людских потоков в местах массового скопления людей (стадионы, аэропорты, вокзалы, метрополитены, торговые центры, учебные заведения, офисные здания и т.д.) и при проведении больших спортивных, религиозных, культурных и других мероприятий.

Под движением людей понимается целенаправленное перемещение людей в зданиях или на местности (эвакуация из зданий или сооружений, движение людей в общественных местах).

Задача моделирования движения людей довольно популярна. Первые модели рассматривали не индивидуальное движение человека, а изменение плотности потока на участке пути со временем (В.М. Предтеченский, А.И. Милинский, В.В. Холщевников, L.F. Henderson, D. Helbing, R.L. Hugles и др.). В настоящее время наибольший интерес представляют модели, где рассматривается движение каждого человека: модель социальных сил (D. Helbing, P. Molnar, I. Farcas, T. Vicsek, T. Kretz, A. Seyfried и др.) и модели на основе клеточных автоматов (КА) (V. J. Blue, J. L. Adler, M. Fukui, Y. Ishibashi, Г. Г. Малинецкий, М. Е. Степанцов, K. Nishinari, J. Was, A. Kirchner, A. Schadschneider, M. Schreckenberg, S. Bandini и др.).

В начале двухтысячных на основе вероятностного клеточного автомата появилась Floor Field (FF) модель (C. Burstedde, K. Klauack, A. Schadschneider, J. Zittartz, K. Nishinari, A. Kirchner, A. Namazi и др.). В её основе лежит использование поля расстояний до выхода для моделирования движущей силы, что явилось существенным улучшением по сравнению с другими моделями и позволило легко воспроизводить направленное движение людей.

Развитие FF модели с целью более точного и полного воспроизведения свойств и особенностей движения людей является целью исследований данной работы. Не найдено формализации некоторых важных свойств движения людей. В оригинальной FF модели существуют ограничения на линейные размеры расчётной области из-за способа использования поля расстояний.

В настоящее время не сложилось единой базы тестовых задач для исследования моделей движения людей. Поэтому разработка тестовых задач и тестирование моделей в различных пространственных ситуациях является важной задачей. Так как время и пространство в FF модели дискретны, для

практического применения модели и для сравнения модельных результатов с данными натуральных экспериментов необходимо определить длительность дискретного шага. Обычно, она определяется как отношение размера ячейки к скорости движения. Размер ячейки известен, а определение скорости движения остаётся открытым вопросом.

Цель исследований: совершенствование клеточно-автоматной стохастической модели движения людей для моделирования движения людей в зданиях и сооружениях различной геометрии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- 1) выделены основные свойства движения людей (индивидуальные и групповые);
- 2) проведён анализ существующих моделей движения людей;
- 3) модифицирована клеточно-автоматная стохастическая модель движения людей: вероятности и правила переходов. Формализованы следующие свойства движения людей: стратегия «кратчайшего пути», стратегия «быстрого пути», взаимодействие с препятствиями, стратегия «терпеливого человека»;
- 4) разработаны и программно реализованы алгоритмы численной реализации модели;
- 5) разработан набор тестовых задач для валидации модели;
- 6) проведены качественные и количественные исследования модели;
- 7) проведено уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения и проведены сравнения с данными натуральных экспериментов.

Методы исследований. В работе используются методы клеточных автоматов, теории вероятностей и математической статистики, вычислительный эксперимент, включающий в себя следующие этапы: математическая формулировка задачи, построение численного алгоритма решения, программная реализация алгоритма, проведение расчетов, анализ полученных результатов.

Научная новизна:

- 1) разработана клеточно-автоматная стохастическая модель движения людей, отличающаяся от известных тем, что введены и формализованы понятия стратегии «терпеливого человека», стратегии «кратчайшего пути» и стратегии «быстрого пути», что позволило улучшить качество воспроизведения движения людей;
- 2) предложено уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения в клеточно-автоматных моделях движения людей: используется не фиксированное значение скорости движения, а зависимость скорости от плотности людей в области. Такое уточнение позволяет оценивать время движения ближе к данным натурального эксперимента;

- 3) предложен набор новых тестовых задач для исследования модели: растекание потока, построение фундаментальных диаграмм не только на прямых участках пути и в сужениях, но и при наличии на пути движения поворотов, что позволяет адекватно оценивать возможности модели;
- 4) предложен новый способ учёта поля расстояний, снимающий ограничение на линейные размеры расчётной области в сравнении с аналогичными моделями.

На защиту выносятся результаты, соответствующие четырём пунктам паспорта специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по техническим наукам.

Пункт 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

1. Формула переходных вероятностей, учитывающая взаимодействие с другими частицами (плотность частиц в направлении) и с препятствиями и позволяющая осуществлять стратегии «кратчайшего пути» и «быстрого пути».
2. Правила переходов, позволяющие осуществлять стратегию «терпеливого человека».
3. Формализация правил переходов.

Пункт 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

4. Способ учёта поля расстояний, снимающий ограничение на линейные размеры расчётной области.
5. Программный комплекс, реализующий численные алгоритмы разработанной модели.

Пункт 6. Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента.

6. Тестовые задачи для исследования модели (растекание потока, построение фундаментальных диаграмм при наличии поворотов).
7. Уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения, на основе которого были проведены сравнения с данными натуральных экспериментов.

Пункт 8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

8. Программный комплекс, реализующий численные алгоритмы разработанной модели, предназначенный для проведения исследований модели и визуализации движения частиц.

Достоверность результатов подтверждается решением большого количества тестовых задач. Результаты имитационного моделирования движения людей с помощью разработанного комплекса программ согласуются с данными соответствующих натуральных экспериментов (из литературных источников), с результатами, полученными другими авторами по данной тематике.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии дискретного стохастического подхода, основанного на методах клеточных автоматов, в задаче моделирования движения людей. Нововведения (стратегии движения, способы учёта плотности размещения людей, близости стен, поля расстояний) позволяют улучшить качество воспроизведения движения людей в модели и расширить область её применения. Предложенный способ уточнения скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения позволяет точнее (ближе к данным натурального эксперимента) оценивать время движения.

Практическая значимость. Результаты работы использовались при создании дискретно-непрерывной модели движения людей (модель Sigma-Eva). Разработанная модель может быть использована для исследования процесса движения людей, когда не требуется точное воспроизведение пространства (массовые мероприятия), для демонстрации процесса движения людей в различных зданиях и сооружениях в качестве одного из способов обучения правилам эвакуации из различных зданий.

Значимость работы подтверждается актами внедрения.

Личный вклад автора состоит в ключевой роли на всех этапах исследования: совершенствование клеточно-автоматной стохастической модели движения людей и способа уточнения скорости для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения; разработка программы, реализующей модель (блок модели и численные исследования); разработка тестовых примеров для тестирования модели. Непосредственно автором были проведены численные исследования модели с последующей обработкой и интерпретацией полученных результатов.

Апробация. Результаты работы были представлены на следующих научных конференциях:

1. VIII и XVI Всероссийские конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Новосибирск, 2007 г.; г. Красноярск, 2015 г.);
2. V, VI, VIII и IX Всесибирские конгрессы женщин – математиков (г. Красноярск, 2008 г., 2010 г., 2014 г., 2016 г.);
3. XIV и XVI Всероссийские семинары «Моделирование неравновесных систем» (ИВМ СО РАН, г. Красноярск, 2011 г. и 2013 г.);
4. конференции молодых ученых Института вычислительного моделирования СО РАН (г. Красноярск, 2010 г., 2011 г. и 2016 г.);
5. конференции молодых ученых Красноярского научного центра СО

- РАН (г. Красноярск, 2011 г. и 2016 г.);
6. XII Международный симпозиум по непараметрическим методам в кибернетике и системному анализу (г. Красноярск, 2010 г.);
 7. Международная конференция по финансово-актуарной математике и эвентоконвергенции технологий (г. Красноярск, 2011 г.);
 8. The Summer Computer Simulation Conference (США, г. Сан-Диего, 2007 г.);
 9. European Conference on Complex System (Германия, г. Дрезден, 2007 г.);
 10. Pedestrian and evacuation dynamics (Германия, г. Вупперталь, 2008 г.; США, г. Гайзерсбург, 2010 г.);
 11. рабочий семинар «On Complex Collective Systems» (Польша, г. Вроцлав, 2009 г.);
 12. рабочие семинары «Crowds and cellular automata» (Италия, г. Асколи-Пичено, 2010 г.; Греция, Санторини, 2012 г.; Польша, г. Краков, 2014 г.).

Развёрнутые доклады по результатам диссертационной работы представлялись на различных научных семинарах институтов Сибирского Отделения РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы, из них 8 — в изданиях, рекомендованных ВАК, 5 — в других рецензируемых изданиях, 11 — в трудах и тезисах международных и всероссийских конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 144 наименований и двух приложений. Полный объём работы составляет 171 страницу, включая 95 рисунков и 5 таблиц.

Содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, сформулирована её цель, обоснована актуальность, представлены результаты, выносимые на защиту, а также определена научная новизна работы.

Первая глава носит обзорный характер. Приведены особенности движения людей, классификация, способы валидации и примеры моделей движения людей.

Из всего многообразия свойств, присущих движению людей, выделены следующие. Цель движения — достижение конечной точки пути. Движение людей — случайный процесс (траектория человека при прохождении одинакового маршрута каждый раз, пусть немного, но отличается от предыдущих). Психологическое отталкивание: люди стараются избегать излишнего контакта друг с другом и не приближаться близко к стенам.

Некоторые свойства движения названы стратегиями движения. В работе введены: *стратегия «кратчайшего пути»* (КП) — стратегия, при которой люди движутся к цели только кратчайшим путём; *стратегия «быст-*

рого пути» (БП) — стратегия, при которой люди движутся к цели быстрым путём: кратчайшим или альтернативным; стратегия «терпеливого человека» — стратегия, при которой человек может остаться на прежнем месте, даже при наличии рядом свободного места.

Предполагается, что учитывая данные свойства, модель будет воспроизводить не только индивидуальное движение человека, но и групповую динамику движения в различных пространственных ситуациях.

Во второй главе представлена клеточно-автоматная стохастическая модель движения людей. Людей будем называть частицами.

Геометрия области моделирования представляется в виде плоской области, разбитой на ячейки $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$ (это средний размер, занимаемый человеком в толпе). Ячейки разделяются на ячейки-частицы, ячейки-препятствия, ячейки-выходы и пустые. Область моделирования удобно представлять в виде двух массивов: массив препятствий $W = \{w_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ и массив частиц $F^t = \{f_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$, t — номер дискретного временного шага:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{в ячейке } (i, j) \text{ частица;} \\ 0, & \text{ячейка } (i, j) \text{ свободна.} \end{cases} \quad w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{в ячейке } (i, j) \text{ препятствие;} \\ 2, & \text{в ячейке } (i, j) \text{ выход;} \\ 0, & \text{ячейка } (i, j) \text{ свободна.} \end{cases}$$

Массив препятствий W задается изначально и не изменяется со временем. Массив F^t изменяется со временем и определяет эволюцию КА.

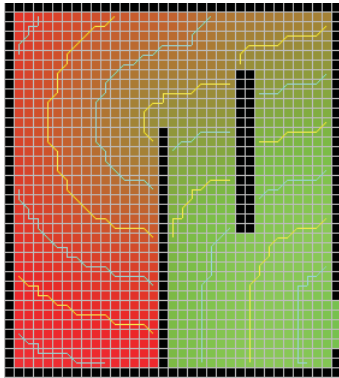


Рисунок 1 – Пример поля S

Геометрия области моделирования известна и отражена в «карте местности» — поле $S = \{s_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ (поле расстояний). Ячейки поля S содержат минимальное расстояние до ближайшего выхода, рисунок 1.

Шаблон соседства $T(i, j) = \{\phi_k(i, j), k = \overline{0, 4}\} = \{(i, j), (i-1, j), (i, j+1), (i+1, j), (i, j-1)\}$. На каждом временном шаге t частица может переместиться в одну из четырех свободных соседних ячеек или остаться на прежнем месте (окрестность фон Неймана). Скорость

частиц в модели $v_{max} = 1$ ячейка/шаг.

Направление движения частицы рассматривается как случайная величина, которая определяется на основе переходных вероятностей в каждом направлении для каждой частицы в каждый дискретный шаг времени. $p_{\phi_k(i, j)}$ — вероятность переместиться в соседнюю ячейку $\phi_k(i, j)$.

Новое положение частицы определяется на основе переходных вероятностей и набором правил переходов. Основным предметом исследования является определение переходных вероятностей и правил переходов для воспроизведения направленного движения частиц к цели в любой геометрии области моделирования с приближенным выполнением выделенных свойств движения людей.

Правила переходов

Переход в новое состояние $F^t \rightarrow F^{t+1}$ осуществляется с помощью подстановки *Transfer*, которая перемещает частицы на новые позиции согласно массиву направлений $R^t = \{r_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$:

$$Transfer(i, j) : Conf(i, j) \star Conf''(i, j) \rightarrow Conf'(i, j), \text{ где}$$

$$Conf(i, j) = \{f_{ij}\},$$

$$Conf'(i, j) = \{trans(i, j)\},$$

$$Conf''(i, j) = \{r_{\phi_0(i,j)}, r_{\phi_1(i,j)}, r_{\phi_2(i,j)}, r_{\phi_3(i,j)}, r_{\phi_4(i,j)}\},$$

$$trans(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } \exists k, k = \overline{0, 4} : r_{\phi_k(i,j)} = (i, j); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Массив направлений R^t хранит все выбранные направления (координаты) $\phi_{k^*}(i, j)$, $k^* \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ для перемещения в момент времени t .

Все конфликтные ситуации разрешаются на стадии определения массива R^t : запрещаются переходы в занятую ячейку и стены, одновременный выбор несколькими частицами одной и той же ячейки.

Режим работы КА – синхронный.

Рассмотрим вычисление массива направлений R^t .

Шаг 1. Вычисление переходных вероятностей.

Каждой частице $f_{ij}^t = 1$, $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ ставятся в соответствие вероятности переходов в соседние ячейки $\{p_{\phi_k(i,j)}, k = \overline{0, 4}\}$.

Вероятность остаться на прежнем месте p_{ϕ_0} непосредственным образом не вычисляется (это связано со способом вычисления переходных вероятностей) и изначально предполагается равной нулю.

Шаг 2. Выбор направлений.

Для каждой частицы на основе ряда $\{p_{\phi_k(i,j)}, k = \overline{0, 4}\}$ выбирается направление для перемещения $\phi_{k^*}(i, j)$ и заполняется массив R^t .

Шаг 3. Реализация стратегии «терпеливого человека».

Для каждой частицы осуществляется проверка выбранных направлений и, в случае выбора занятого направления, реализуется стратегия «терпеливого человека». Для частиц, у которых выбранная целевая ячейка $\phi_{k^*}(i, j)$ занята ($f_{r_{ij}} = f_{\phi_{k^*}(i,j)} = 1$), происходит пересчёт переходных вероятностей:

$$p'_{\phi_0(i,j)} = \sum_{k: f_{\phi_k(i,j)}=1} p_{\phi_k(i,j)};$$

$$p'_{\phi_k(i,j)} = 0, \text{ если } f_{\phi_k(i,j)} = 1, k = \overline{1, 4};$$

$$p'_{\phi_k(i,j)} = p_{\phi_k(i,j)}, \text{ если } f_{\phi_k(i,j)} = 0, k = \overline{1, 4}.$$

Направление для перемещения $\phi_{k^*}(i, j)$ выбирается снова на основе ряда $\{p'_{\phi_k(i,j)}, k = \overline{0, 4}\}$ среди оставшихся свободных соседних ячеек и текущей. R^t переопределяется. Такая процедура позволяет сначала определять

желаемое направление для перемещения, а потом корректировать его в зависимости от ситуации: остаться на месте и подождать, пока желаемое направление освободится, или выбрать другое.

Определение. Для частицы с координатами (i, j) выполняется стратегия «терпеливого человека», если $r_{ij} = (i, j)$ и $\exists k, k = \overline{1, 4} : f_{\phi_k(i, j)} = 0$.

Замечание. Если все соседние ячейки свободны, частица переместится на новое место: $r_{ij} = \phi_{k^*}(i, j)$, если $\forall k, k = \overline{1, 4} : f_{\phi_k(i, j)} = 0$.

Шаг 4. Разрешение конфликтов.

Конфликтные ситуации возникают, когда две или более частицы являются претендентами на одну ячейку. В случае возникновения конфликтов, всем претендентам назначается некоторое случайное число из $R[0; 1]$ (мера «желания» переместиться). Разрешается переместиться только той частице, у которой «желание» переместиться больше, остальные остаются на своих прежних местах.

Определение. Ячейка (i, j) – ячейка конфликта, если существует хотя бы одна пара чисел k_1, k_2 таких, что $k_1 \neq k_2, k_1 = \overline{1, 4}, k_2 = \overline{1, 4}$, для которых $r_{\phi_{k_1}(i, j)} = r_{\phi_{k_2}(i, j)} = (i, j)$.

На этом шаге процедура определения массива R^t заканчивается.

Переходные вероятности

Переходные вероятности $p_{\phi_k(i, j)}$ определяют направления перемещения и вычисляются по формуле:

$$p_{\phi_k(i, j)} = \frac{\tilde{p}_{\phi_k(i, j)}}{Norm_{\phi_k(i, j)}} |1 - w_{\phi_k(i, j)}|, k = \overline{1, 4},$$

$$\tilde{p}_{\phi_k(i, j)} = e^{k_S \Delta S_{\phi_k(i, j)} - k_P D_{\phi_k(i, j)}(r_{\phi_k(i, j)}^*) - k_W \left(1 - \frac{r_{\phi_k(i, j)}^*}{r}\right) A_{\phi_k(i, j)}^{wall}},$$

$$Norm = \sum_{k=1}^4 \tilde{p}_{\phi_k(i, j)}, Norm \neq 0, \tilde{p}_{\phi_k(i, j)} \geq 0. \tilde{p}_{\phi_k(i, j)} = 0 \iff w_{\phi_k(i, j)} = 1.$$

Переходы в ячейки-препятствия запрещены: $|1 - w_{\phi_k(i, j)}| = 0$.

$r^* \in [0; r]$ – количество ячеек до ближайшего препятствия.

$\Delta S_{\phi_k(i, j)}$ – главная движущая сила для частиц. $\Delta S_{\phi_k(i, j)} = s_{\phi_0(i, j)} - s_{\phi_k(i, j)}$ показывает в какой стороне находится выход. Использование $\Delta S_{\phi_k(i, j)} \in [-1; 1]$ дает вычислительное преимущество перед чистым значением $s_{\phi_k(i, j)}$ (которое используется традиционно), т.к. значение поля S зависит от размера области моделирования и может быть очень большим, а значение $\exp[k_S s_{\phi_k(i, j)}]$ не вычислимым.

$D_{\phi_k(i, j)}(r^*) \in [0; 1]$ – плотность частиц в направлении $\phi_k(i, j)$, учитывающая близость других частиц к рассматриваемой. Вычисляется с помощью ядерной оценки плотности Розенבלата-Парзена.

$1 - r_{\phi_k(i, j)}^*/r \in [0; 1]$ оценивает близость стен и других препятствий.

$A_{\phi_k(i, j)}^{wall} \in \{0; 1\}$ учитывает влияние стен и других препятствий, когда в направлении $\phi_k(i, j)$ нет других частиц и направление ведёт к выходу.

Параметры модели. $k_S \geq 0$ – регулирует влияние поля расстояний S и желание двигаться к выходу. $k_P \geq 0$ – регулирует влияние плотности частиц. $k_W \geq 0$ – регулирует влияние стен. $r > 0$, $r \in \mathbb{Z}$ – радиус видимости, определяет расстояние (в ячейках), в пределах которого окружающая обстановка влияет на принятие решения о выборе направления.

При вычислении $p_{\phi_k(i,j)}$ учитывается поле расстояний S , плотность частиц и влияние стен. Идея использования этих компонент присутствует в том или ином виде и в других моделях движения людей, но именно взаимодействие параметров модели даёт реализацию стратегий «кратчайшего пути» и «быстрого пути» и приводит к более адекватному моделированию динамики движения людей.

Определение. Для частицы с координатами (i, j) выполняется стратегия «кратчайшего пути», если $\forall k, k = \overline{1, 4} : s_{\phi_k(i,j)} \geq s_{\phi_k^*(i,j)}, k \neq k^*$ ($k_P \leq k_S, r \geq 1$).

Для частицы с координатами (i, j) выполняется стратегия «быстрого пути», если $\exists k, k = \overline{1, 4} : s_{\phi_k(i,j)} \leq s_{\phi_k^*(i,j)}, k \neq k^*$ ($k_P > k_S, r > 1$).

Третья глава посвящена исследованию разработанной модели на различных тестовых задачах.

Введём обозначения: N – количество частиц в области; T_{cp} , [шаг] – оценка математического ожидания времени выхода, вычисленная по M экспериментам; ρ_0 , [$1/\text{м}^2$] – начальная плотность частиц в области (т.е. в момент времени $t = 0$) при открытых граничных условиях; ρ , [$1/\text{м}^2$] – плотность частиц в области при периодических граничных условиях; $J_s = \frac{N}{T_{cp} b}$, [$1/(\text{м} \cdot \text{шаг})$] – удельный поток, b – ширина проёма (сечения).

Программная реализация модели осуществлена на языке ActionScript на платформе Adobe Flash. В **разделе 3.2** представлены вычислительные алгоритмы модели. Разработанный программный комплекс позволяет не только наблюдать процесс движения, но и собирать необходимые сведения о движении частиц. Полученные данные обрабатывались в MS Excel с использованием методов математической статистики.

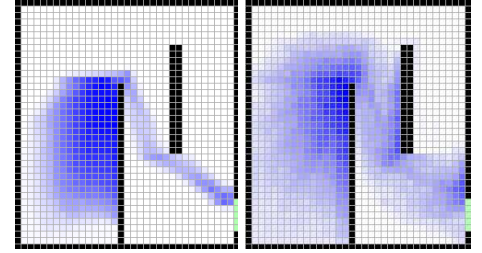
В **разделе 3.3** исследуется влияние параметров k_S , k_P и r на время эвакуации и на динамику движения частиц на примере простой квадратной комнаты с одним выходом. Увеличение влияния поля расстояний, параметра k_S , приводит к более направленному движению частиц к выходу, уменьшению T_{cp} . При большем k_S параметры k_P и r незначительно изменяют T_{cp} , но влияют на процесс движения частиц.

В **разделе 3.4** сравниваются стратегии кратчайшего пути и быстрого пути, для чего рассматриваются прямой коридор (стратегии совпадают) и помещение с более сложной геометрией (использование стратегий зависит от ситуации).

Интенсивность движения по ячейкам сложной геометрии (рисунок 2) показывает, что при $k_P = 2$ частицы идут к выходу по кратчайшему пути.

Увеличение k_P приводит к возрастанию влияния плотности частиц, они стремятся разуплотниться, начинают больше использовать доступное пространство и идти к выходу не самым коротким путём ($k_P = 12$).

На рисунке 3 отражены зависимости времени T_{cp} и среднего квадратического отклонения времени движения (СКО) от параметра k_P . Для каждого примера существует значение параметра k_P , при котором T_{cp} принимает минимальное значение. Увеличение k_P для коридора приводит к увеличению T_{cp} , а в сложной геометрии, наоборот, к уменьшению. Точно также параметры k_P и r влияют и на СКО. Чем меньше T_{cp} , тем меньше и СКО.



$k_P = 2$

$k_P = 12$

Рисунок 2 – Интенсивность посещения ячеек в зависимости от k_P , $r = 10$, $k_S = k_W = 4$

Также показано, что сложная геометрия более чувствительна к параметрам k_P и r , чем коридор, что особенно проявляется с увеличением ρ_0 .

Таким образом, существует две различных стратегии движения. Параметры модели влияют не только на их реализацию, но и на время движения. Для адекватного моделирования процесса необходимо правильно подбирать параметры модели в зависимости от вида пути.

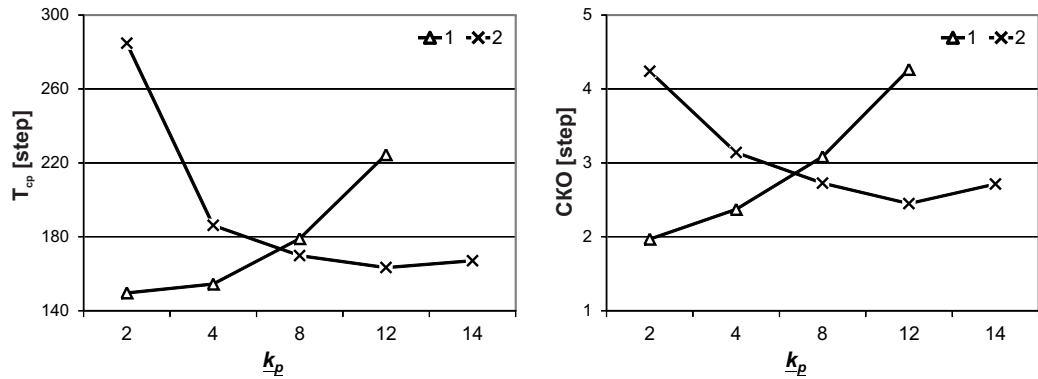


Рисунок 3 – Зависимость T_{cp} (слева) и СКО (справа) от параметра k_P для коридора («1») и сложной геометрии («2»). $\rho_0 = 0,48$, $r = 10$, $k_S = k_W = 4$

В разделах 3.5 и 3.6 исследовалось пересечение и слияние потоков. Показано, что достигается предельная плотность пересекающихся потоков, которая при определённых параметрах модели, соответствует предельной плотности при натуральных наблюдениях; качественно картина слияния потоков в модели похожа на данные натурального эксперимента.

В разделе 3.7 с помощью специально разработанного теста показано, что в модели реализуется растекание потока. Растекание или разуплотнение потока наиболее чётко проявляется на протяжённых участках пути.

Рассматривается три коридора различной длины (50 м., 100 м. и 150 м.) шириной 2 м. Частицы располагаются на первых пятидесяти метрах с раз-

личной плотностью ρ_0 . Параметры модели $k_S = k_W = k_P = 4$, $r = 10$. Для каждого коридора проведено $M = 500$ экспериментов и вычислены T_{cp} и J_s , рисунок 4. При вычислении J_s для коридоров 100 и 150 метров используется время T_{cp} без учёта времени добегающего фронта частиц до контрольной отсечки. Значения потоков для коридоров 100 и 150 метров меньше, чем для коридора 50 метров, что позволяет сделать вывод: в модели реализуется растекание потока.

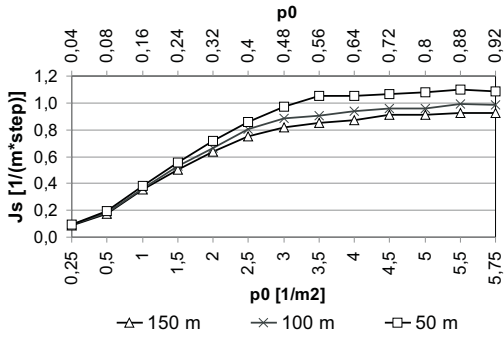


Рисунок 4 – $J_s(\rho_0)$ для коридоров различной длины

(ФД) — зависимости потока от плотности $J_s(\rho)$. ФД является главным критерием проверки адекватности моделей движения людей.

При $\rho_0 \approx 3$ [1/м²] удельный поток перестает изменяться, т.е. достигается максимальная пропускная способность сечения. Полученный результат совпадает с результатами для других моделей.

В разделе 3.8 рассматривается пример выхода частиц из двухэтажного здания (учебное заведение). Анализируется загруженность выходов.

В четвертой главе рассматривается построение фундаментальных диаграмм

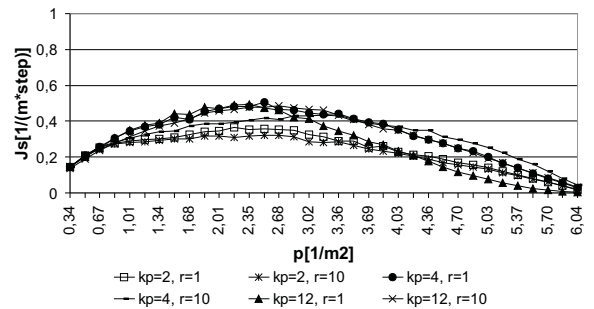
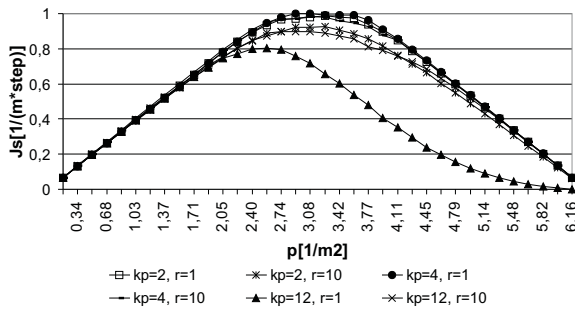


Рисунок 5 – $J_s(\rho)$ для прямого коридора (слева) и коридора с четырьмя поворотами (справа) при различных k_P и r . $k_S = k_W = 4$

На рисунке 5 отражены ФД для прямого коридора (2м×50м) и для коридора с четырьмя поворотами (ширина 2 м) при периодических граничных условиях. При таких условиях в области поддерживается постоянное количество частиц, тем самым обеспечивается постоянная плотность движения (данные натурального эксперимента получают в похожих условиях). Модельные результаты соответствуют данным натурального эксперимента и оригинальной FF модели. В отличие от FF модели переход от возрастания потока к убыванию более гладкий, что соответствует данным натурального эксперимента (из литературных источников).

Наличие поворота влияет на $J_s(\rho)$ и уменьшает его в два раза на средних плотностях по сравнению с прямым коридором (рисунок 5). Количество (больше одного) однообразных поворотов существенно не влияет на $J_s(\rho)$.

Исследование ФД при сужениях прохода показало: при постоянной плотности перед сужением J_s практически не изменяется с увеличением ширины проема, что согласуется с данными натурального эксперимента.

В разделе 4.2 предложено уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения.

Пусть Δt – время, за которое совершается один временной шаг:

$$\Delta t = \frac{0,4}{V},$$

V – скорость движения; $0,4$ [м] – размер ячейки (длина одного шага).

Традиционно, значение Δt постоянно и вычисляется с помощью скорости свободного движения. На рисунке 6 (слева) показано сравнение переведенного в естественные единицы модельного потока при $\Delta t = 0,3$ [с] с ФД, вычисленными по данным натурального эксперимента (красные кривые). Наблюдается соответствие лишь с некоторыми ФД на малых плотностях.

Известно, что скорость движения V зависит от плотности потока ρ , в котором он находится. Для вычисления Δt предложено использовать зависимость $V(\rho)$. Сравнение модельных данных с данными U.Weidmann представлено на рисунке 6 (справа) (модельные результаты сравнивались и с данными SFPE и В.В. Холщевникова). Модельные результаты соответствуют всем рассмотренным ФД по данным натурального эксперимента до $\rho = 2,88$ [1/м²] с точностью 15%, что является хорошим результатом (при проектировании зданий не допускается образование больших плотностей).

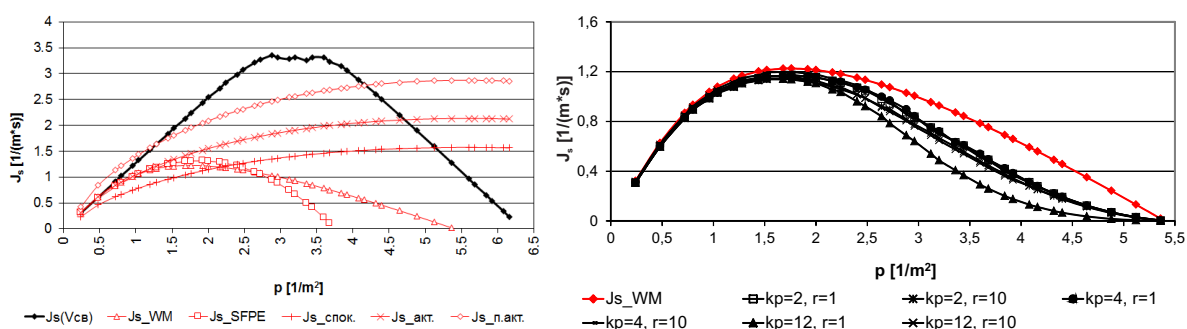


Рисунок 6 – Удельные потоки, вычисленные по данным модельного (чёрные кривые) и натурального экспериментов (красные кривые). Слева – $\Delta t = 0,3$ [с], $k_P = k_S = k_W = 4, r = 10$. Справа – $\Delta t = \frac{0,4}{V(\rho)}$ [с], $k_S = k_W = 4$

В разделе 4.3 анализируется процесс выхода из Камерного и Малого концертного (МКЗ) залов Красноярской филармонии. Рассматривается два сценария: свободный – «С» (путь к выходу выбирается в процессе движения) и по плану эвакуации – «ПЭ» (путь назначен согласно плану).

В Камерном зале время T_{cp} практически не зависит от сценария, а в МКЗ, наоборот, сценарий значительно влияет на T_{cp} . В МКЗ при сценарии «С» один ряд частиц, которым предписан нижний выход в сценарии «ПЭ» (обозначены на рисунке 7 синим цветом), выходят через верхний. Нагрузка

на выходы распределятся более равномерно и нижний выход разгружается, что позволяет уменьшать время. Таким образом, маршрутизация потоков позволяет уменьшать время.

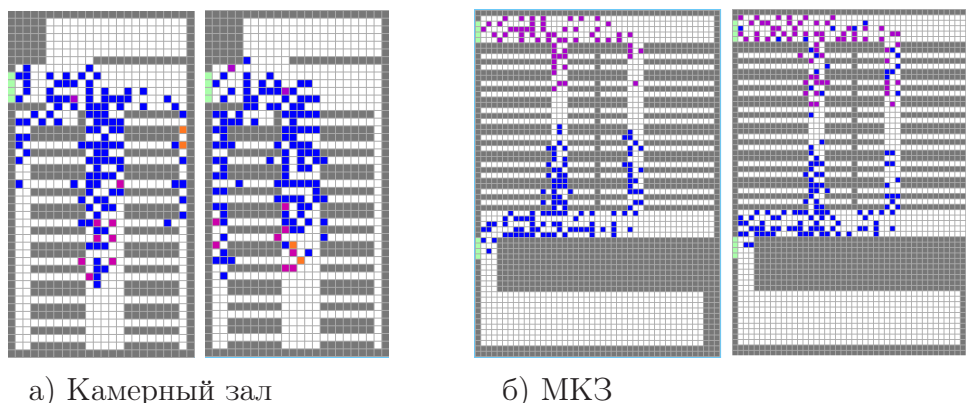


Рисунок 7 – Динамика движения из а) Камерного зала в момент времени $t=18$ [с]; б) МКЗ в $t=42$ [с]. Рисунки слева показывают динамику для сценария по плану эвакуации, справа — для свободного сценария

В **заклучении** сформулированы основные результаты работы:

- 1) разработана клеточно-автоматная стохастическая модель движения людей, в которой впервые были введены и формализованы понятия стратегии «терпеливого человека», стратегии «кратчайшего пути» и стратегии «быстрого пути». В отличие от других работ при вычислении переходных вероятностей учитывается плотность размещения частиц в направлении в зависимости от близости других частиц к текущей, стены и препятствия учитываются только в тех направлениях, которые ведут к выходу и в которых нет других частиц. Предложен новый способ учёта поля расстояний в формуле переходных вероятностей, что позволило снять существующие ограничения на размеры расчётной области в сравнении с аналогичными моделями. Формализованы правила переходов;
- 2) разработаны и программно реализованы численные алгоритмы модели, позволяющие визуализировать движение частиц и проводить исследования модели;
- 3) изучено влияние параметров модели на динамику движения частиц: параметры модели влияют на динамику движения частиц, на время выхода, регулируют направленность движения и выбор стратегий «кратчайшего пути» и «быстрого пути»;
- 4) предложены тестовые задачи для исследования модели: растекание потока, сравнение фундаментальных диаграмм для прямых участков пути и с поворотами;
- 5) проведены исследования модели на различных тестовых задачах. Построены фундаментальные диаграммы. Результаты исследований согласуются с данными натуральных экспериментов и с результатами дру-

гих моделей движения людей;

- б) предложено уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения (в минуты или секунды). Разработанная модель согласуется с фундаментальными диаграммами по данным натуральных экспериментов (из литературных источников) на прямых участках пути при плотностях до $2,88 [1/м^2]$.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Kirik, E. Artificial Intelligence of Virtual People in CA FF Pedestrian Dynamics Model/ E. Kirik, **T. Yurgel'yan (Vitova)**, D. Krouglov// Lecture Notes in Computer Science. Parallel Processing and Applied Mathematics. – 2010. – Vol. 6068. – P. 513-520.
2. Kirik, E. On Influencing of a Space Geometry on Dynamics of Some CA Pedestrian Movement Model/ E. Kirik, **T. Yurgel'yan (Vitova)**, D. Krouglov// Lecture Notes in Computer Science. Cellular Automata. – 2010. – Vol. 6350. – P. 474-479.
3. **Юргельян (Витова)**, Т. Б. О валидации модели движения людей SIGMA.CA по данным фундаментальных диаграмм/ Т.Б. Юргельян, Е.С. Кирик, Д.В. Круглов// Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2010. – № 5. – С.162-166.
4. Kirik, E. On realizing the shortest time strategy in a CA FF pedestrian dynamics model/ E. Kirik, **T. Yurgel'yan (Vitova)**, D. Krouglov// Cybernetics and Systems. – 2011. – Vol. 42(1) – P. 1-15.
5. **Юргельян (Витова)**, Т. Б. О чувствительности математической модели движения людей SIGMA.CA к геометрии пути/ Т.Б. Юргельян, Е.С. Кирик, Д.В. Круглов// Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. – 2011. – Т.4, №4. – С. 556-568.
6. Kirik, E. On Validation of the SIGMA.CA Pedestrian Dynamics Model with Bottleneck Flow/ E. Kirik, **T. Vitova**// Lecture Notes in Computer Science. Cellular Automata. – 2012. – Vol. 7495. – P. 719-727.
7. Kirik, E. Cellular Automata Pedestrian Movement Model SIGMA.CA: Model Parameters as an Instrument to Regulate Movement Regimes/ E. Kirik, **T. Vitova**// Lecture Notes in Computer Science. Cellular Automata. – 2014. – V. 8751. – P. 501-507.
8. Kirik, E. On Formal Presentation of Update Rules, Density Estimate and Using Floor Fields in CA FF Pedestrian Dynamics Model SIGMA.CA/ E. Kirik, **T. Vitova**// Lecture Notes in Computer Science. Cellular Automata. – 2016. – V. 9863. – P. 435-445.